

原子力発電プラントは、運転開始後20年を超えるものが増えつつあり、運転プラントの保全に対する本格的な取組みが要請されている。当社では、早くから原子炉圧力容器(RPV: Reactor Pressure Vessel)や炉内構造物を最重要機器として位置づけ、保全技術の開発・実用化に努めてきた。特に、当社が開発に大きく注力してきたレーザを応用した保全技術については、レーザピーニング、レーザ脱鋭敏化処理(LDT: Laser Desensitization Treatment)を中心に近年実機にも適用実績を上げてきている。

更に、今後は上記の予防保全への適用範囲拡大とともに、補修技術、検査技術などへの広範・多岐にわたる展開を図っていく。

Toshiba places the highest priority on maintenance technologies for the reactor pressure vessel (RPV) and its internals in operating nuclear power plants. This paper summarizes the status of applied laser maintenance technologies, both preventive and repair.

For laser peening and laser desensitization treatment (LDT) technologies in particular, field applications are also described in detail. In the future, the area of field applications for preventive maintenance, repair, and inspection technologies will be further expanded.

1 まえがき

初期に建設された原子力発電プラントは、運転開始以来20年以上が経過しており、電力の安定供給を図るために運転プラントの保全に対する本格的な取組みが要請されている。特に、RPVや炉内構造物をもっとも重要な機器の一つであり、保全の優先度が高い。しかし、これらの機器は、複雑な構造であることが多く、かつ高い放射線線量下にあることや、保全工事の実施にあたり必ず遠隔作業となるため、高度な遠隔自動化技術が必要である¹⁾。

当社では、早くからこれらの技術の開発に着手し、炉心シュラウド取替などの大規模保全工事にも多くの実績を上げてきた²⁾が、当社が特に開発に注力してきたのが、個々の炉内機器に対するレーザを応用した保全技術であり、これらは近年実機に対し、多くの実績を上げてきている。

ここでは、レーザを応用した主として炉内の予防保全技術について開発状況から、実機プラントへの適用までを紹介するとともに、補修技術などの今後の展開についても述べることにする。

2 レーザ応用の炉内保全技術

RPVや炉内構造物の構成材料については、RPVは主に低合金鋼製の母材にステンレス鋼やニッケル基合金が被覆されており、炉内構造物は主としてステンレス鋼で製作され、

RPVとの接合部などにはニッケル基合金が用いられている。

初期の沸騰水型原子炉(BWR)で用いられている材料の一部で、溶接部近傍に応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)を発生させる可能性が想定されており、保全技術によりこれを未然に防止することが急務となっている。

特に、レーザを用いた保全技術は、いずれも非接触施工であり、施工上の反力もほとんどないこと、その入熱が小さく、施工部周辺への影響が小さいこと、また、レーザの伝送・制御が容易であり、施工装置、システムも小型化できることにより、遠隔な狭あい部についても施工が容易なことなどの利点があり、炉内への保全対策として最適な特質を持っている。そのため、当社では、炉内保全技術の柱として、開発・実用化に特に注力してきた。レーザを応用した保全技術開発・適用の状況を図1に示す。

既に、多くのプラントの100本を超えるICM(In-Core Monitor)ハウジングに対し、レーザクラッドを適用し、近年では炉心シュラウドに対しレーザピーニング、ジェットポンプのライザ管に対しLDTを適用してきた。また、耐食性の良好な材料をクラッドするレーザCRC(Corrosion Resistant Cladding)法についても開発を進めている。

レーザ応用技術は、予防保全としての利用だけでなく、欠陥の除去・封止、水中の補修溶接も可能であり、事後保全の観点からもこれらの実用化を進めている。

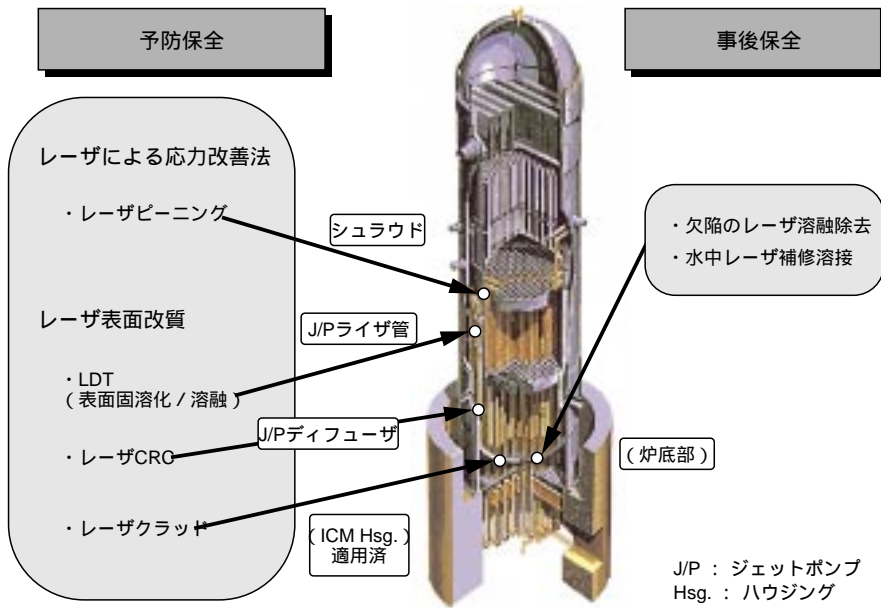


図1. レーザ応用技術による炉内保全 予防保全から事後保全まで炉内の主要機器に対して対応が可能となっている。
Laser application maintenance technologies for RPV and internals

3 レーザピーニングの炉心シュラウドへの適用

レーザピーニングは、水中でのパルスレーザのプラズマ発生に伴う衝撃力により、材料表面の溶接などにより発生した引張残留応力を約1 mm以上の深さまで圧縮残留応力に変換し、SCCを防止するものである。その応力改善効果が極めて大きいことが優れた特長となっており、また、レーザを用いるものの、材料への入熱がほとんどないため、中性子照射を受ける炉心の機器への適用に最適である。

レーザピーニングについては、約40 mの距離でも高い精度で施工点を制御することができるレーザ遠隔伝送技術、小型・軽量化を図った施工の自動機器、施工監視技術など多岐にわたる開発を集中的に行い、図2に示すような炉心シュラウドの狭あいな構造の部位へのアクセスが容易な施工システムを完成した。

特に、レーザ系、遠隔駆動系はともにシステムとして徹底した小型化を図り、パルスレーザをレーザ発振器から約40 m先の施工部まで±0.1 mmという高い位置決め精度で気中伝送する技術(自動アライメントシステム)を確立させた。また、伝送されたレーザは、ヘッドの光学系を高精度に駆動することにより、炉心シュラウドの複雑な形状の溶接部近傍に対して正確に走査させることができる⁽³⁾。実機大模擬試験での工法及びシステムの十分な検証を経て、実機の炉心シュラウドの予防保全対策として世界で初めて適用した。施工装置と施工状況の例を図3に、施工した炉心シュラウドの溶接線を図4に示す。更に、より狭あいな部位に対しては、パルスレーザをファイバで伝送することも可能であり、今後

は、シュラウド以外の炉内機器への適用を図るため、実用化を進めていく。例えば、ニッケル基合金製の管状の構造物に対しても十分な残留応力改善ができることが確認されており、適用可能範囲は極めて大きい。

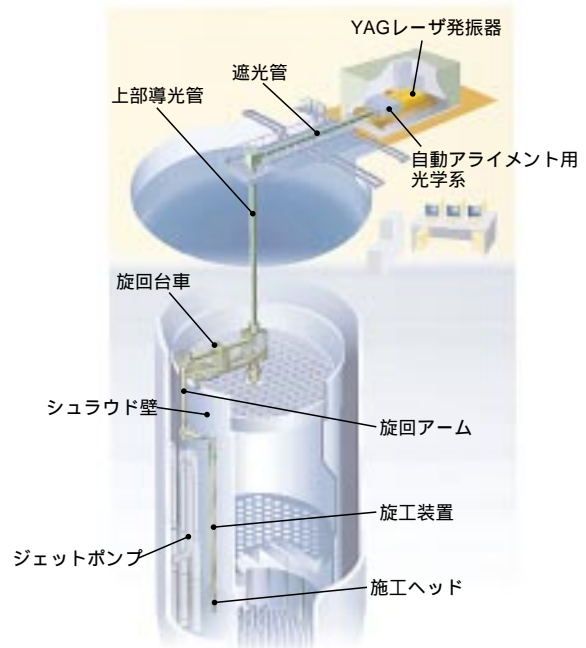
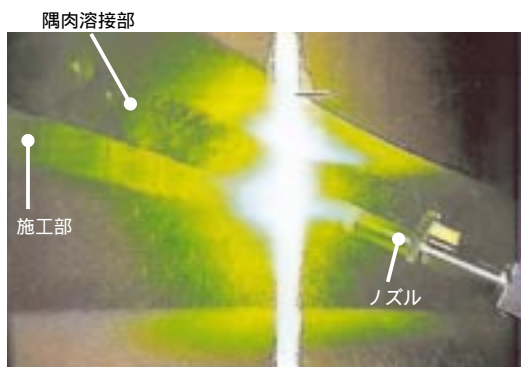


図2. 炉心シュラウドへのレーザピーニング施工概念 シュラウドとジェットポンプ間の狭あい部分にもアクセスでき、十分な施工が可能である。
Concept of laser peening of core shroud



(a) レーザーピーニング施工状況 (内側溶接線)



(b) レーザーピーニング施工装置 (内側溶接線用)

図3 .レーザーピーニングの炉心シュラウドへの施工 (a)は実機シュラウドの隅肉溶接部近傍への施工状況を示し,光っている部分がレーザー光である。(b)は施工装置のヘッド部であり,対象溶接部への正確な施工が可能である。

Application of laser peening to core shroud

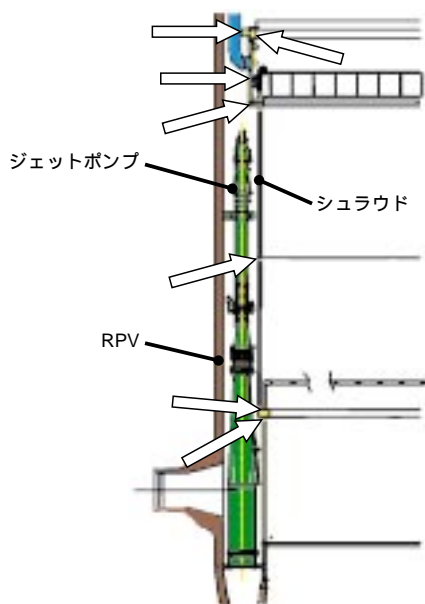


図4 .レーザーピーニングを施工した炉心シュラウド溶接部 矢印は施工した溶接線を示す。

Positions of laser peening application to core shroud

4 LDTの炉内への適用

連続波レーザーを熱源として用いる方法として,レーザーで材料表面を急熱・急冷し,表面を溶融もしくは固溶化させてSCCの原因となるクロム炭化物を消失させるLDTを開発した。

このLDTは,特にジェットポンプのライザ管などの比較的薄肉の管への適用に有用であり,内面への施工で外面の応力改善を行うことができ,内外面両方のSCC対策がとれるこ

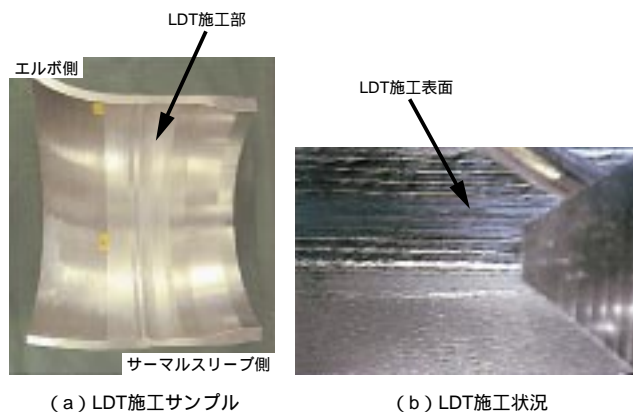
とが大きな特長である⁽⁴⁾。

LDTについては,基本技術の確証試験に加え,十分な実機大模擬試験での工法及びシステムの検証を経て,実機プラントのジェットポンプライザ管の予防保全対策として世界で初めて適用した。

施工の状況を図5に示すが溶接部近傍に良好なLDT層が形成されていることがわかる。サンプルの断面金属写真からも深さ方向に十分なLDT層(溶融及び固溶化層)が認められる。また,サンプルの残留応力測定から,図6に示すように外面で十分な応力改善がなされていることがわかる。

また,LDTの実機施工の概念を図7に示す。

炉外側からRPVノズルを介してLDT施工装置が炉内のジェットポンプライザ管内に導入され,光ファイバにより原子炉



(a) LDT施工サンプル

(b) LDT施工状況

図5 .LDTの適用 管内面に良好なLDTが形成されている。(b)は実機での施工状況である。

Application of LDT to jet pump riser pipe

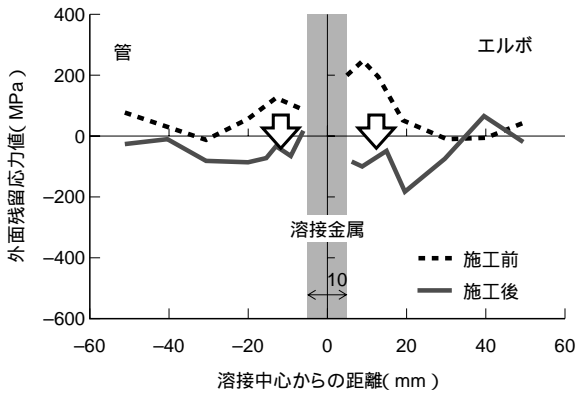
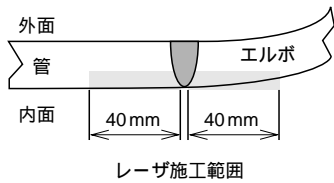


図6 . LDTによる管外面の残留応力改善 LDT施工により内・外面の対策が同時に行えるのが大きな特長である。
Residual stress improvement of pipe outer surface by LDT

建屋外からレーザーが約160 m伝送されて気中遠隔でLDTの施工が行われた。LDT施工装置は、管内面へのLDT施工に必要な基本機能に加え、管の中心に精度良くセットできる心出し位置決め機構や監視カメラ、溶接線検出装置などを搭載しており、更にライザ管のエルボも通過できるコンパクトな機構も開発した。

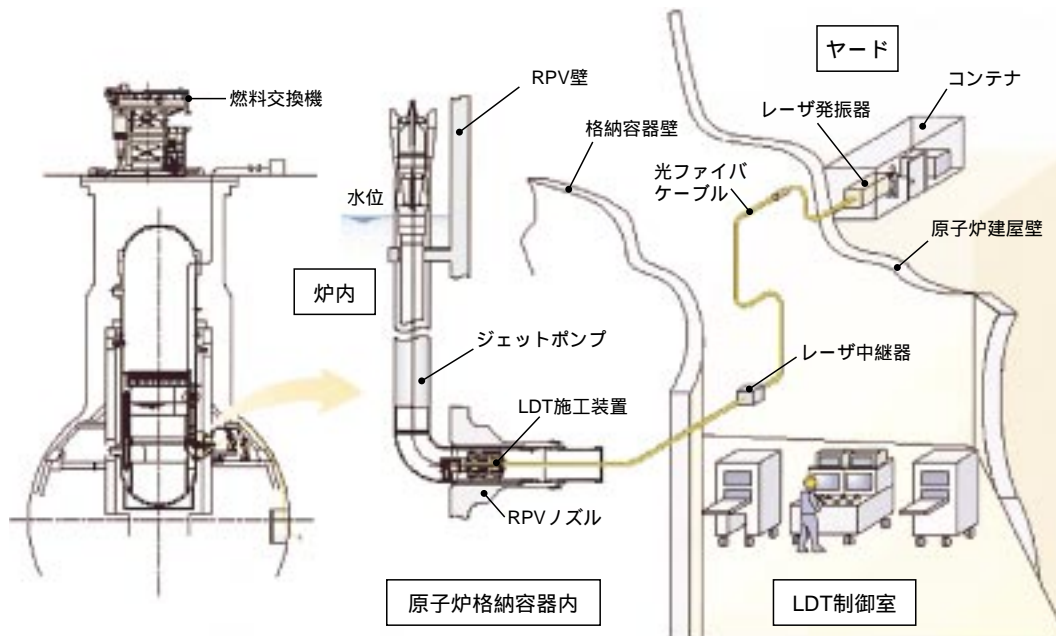


図7 . LDTのジェットポンプライザ管への現地施工概念
Concept of field application of LDT to jet pump

レーザーが光ファイバにより炉内へ伝送され、遠隔自動でLDTの施工が実施された。

今後は、水中でのLDT施工工法とシステムを確立し、適用範囲のいっそうの拡大を図っていく予定である。

5 レーザ応用の補修技術など

レーザー溶接は、エネルギー密度が高く、限定された部位への施工が可能で、急熱・急冷のため入熱が小さく、周辺への熱影響が小さいことに加え、装置の小型化が可能のため狭い部位への施工が容易など、炉内にもっとも適した補修工法である。レーザーを応用した溶接技術自体は、既に確立しており、これを炉内の補修に確実に適用できるようにすることが急務となっている。図8に示すように、炉内の種々の機器に対応するレーザー補修溶接装置・システムを試作し、水中施工の条件確認を行った。また、通常の補修溶接だけでなく、欠陥の溶融除去や封止も可能である。

今後は、レーザー系の最適化や遠隔駆動系の開発により、炉内に広く適用可能な水中レーザー補修溶接のシステムや工法を確立するとともに、前述のレーザーCRCやLDTなどの予防保全と組み合わせたシステムを開発していく。

また、保全の適用にあたり炉内の酸化膜除去や除染が必要となり、これに対してもレーザー応用技術の適用に取り組んでいる。特に、パルスレーザーを平行光として機器表面に照射することにより、母材又は酸化皮膜分子が振動励起され表層の酸化皮膜を除去できる。図9に、そのシステムと配管内の酸化膜除去の試験状況を示すが、種々の炉内条件で表面研磨が可能なが確認できた。

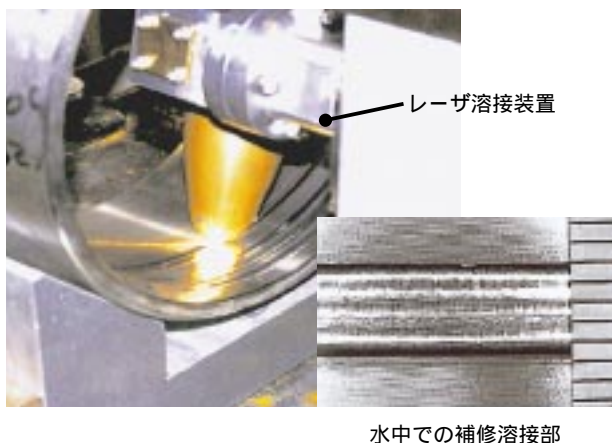


図8. レーザ補修溶接 水中で安定した補修溶接が可能となった。
Laser repair welding

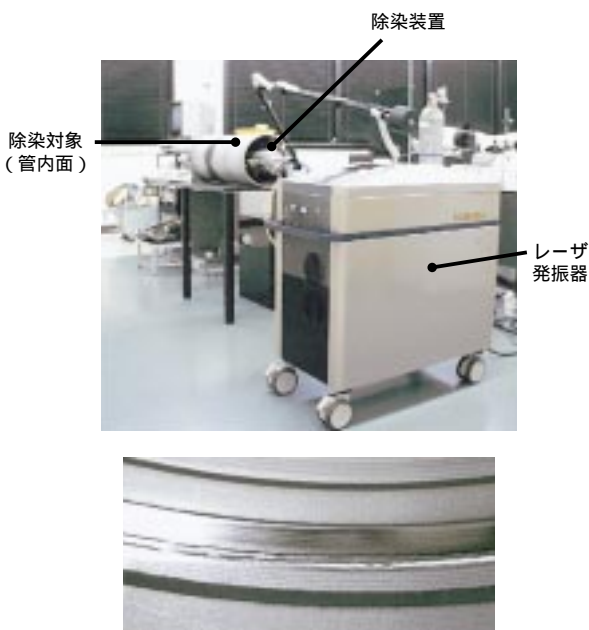


図9. レーザを用いた酸化膜除去 下図の管内面光沢部がパルスレーザーにより酸化膜が除去された部分である。
Removal of surface oxide using pulse laser

6 あとがき

原子力発電プラントの保全の柱として、レーザーを応用した炉内の保全技術の開発・実用化に注力し、レーザーピーニング、LDTなどの最先端の技術を実機プラントへ成功裏に適用することができた。このような技術を更に広く適用することにより、プラントの安定運転の確保に役だてることができ

ると考えられる。また、今回紹介した技術以外に、レーザー超音波探傷法など保全の周辺技術として今後広範な適用が期待される新技術も開発しており、早期の適用を図っていく予定である。特に、レーザー超音波探傷法は、パルスレーザーで励起された超音波を用いて欠陥を検知するもので、検出能力に優れ、空間分解能も高く、更に非接触のため遠隔自動化が容易であることなどの特長を持ち、システムとしての発展性を持っている。

高経年化プラントが今後、ますます増えてくることから更なる技術開発に注力し、原子力プラントの高い信頼性の確保のために、よりいっそうの努力をしていく所存である。

謝 辞

このたび、技術開発から適用にあたり、ご協力いただいた中部電力(株)に感謝するとともに、今後もよりいっそうのご指導とご支援をお願いする次第である。

文 献

- 宮野 廣,ほか. 原子力プラントリフレッシュ. 東芝レビュー. 53, 10, 1998, p.49 - 52.
- 宮野 廣,ほか. 原子力プラントの大型保全技術 - シュラウド取替工法. 東芝レビュー. 53, 9, 1998, p.57 - 60.
- 佐野雄二,ほか. レーザピーニング法による原子炉内構造物の残留応力改善. 東芝レビュー. 53, 10, 1998, p.49 - 52.
- Kono, W., et al. "LASER DE-SENSITIZATION HEAT TREATMENT FOR INNER SURFACE OF SUS304 STAINLESS STEEL PIPE WELDS". 7th International Conference on Nuclear Engineering. 7251, 1999.



佐藤 健次 SATO Kenji
電力システム社 原子力事業部 原子力機器設計部部長。
BWR原子力発電プラント機器の設計業務に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



小林 雅弘 KOBAYASHI Masahiro
電力システム社 京浜事業所 原子力機器部主幹。
BWR原子力発電プラント炉内機器の設計及び製造技術設計に従事。
Keihin Product Operations



佐野 雄二 SANO Yuji
電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 機器・システム開発部主幹。レーザーによる原子炉保全・補修システムの開発に従事。日本原子力学会, レーザ学会, 電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



木村 盛一郎 KIMURA Seiichiro, D. Eng
電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 機器・システム開発部グループ長, 工博。レーザーによる原子炉補修システム及び製造技術の開発に従事。溶接学会, 日本原子力学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center